

بازیابی سطوح تخریبی اتصال تداخلی شفت و یا تاقان با استفاده از آبکاری کروم سخت

رحمان سیفی^{1*}، کاوه عباسی²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بولی سینا، همدان

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بولی سینا، همدان

* همدان، صندوق پستی 65175-4161

چکیده

اتصالات تداخلی برای برقراری اتصال بوش به شفت در صنعت کاربرد زیادی داشته و اغلب در محل وجود تکیه گاهها و یاتاقان‌های ماشین‌ها از این نوع اتصالات برای حمل بار اجزاء ماشین استفاده می‌گردد. معمولاً برای انجام تعمیرات ماشین‌ها فرآیند دموتاژ نمونه بوش و شفت به دفعات انجام می‌گیرد. بسته به میزان زبری و کیفیت سطح اجزاء اتصال، ممکن است در زمان فرآیند تخریب در سطح قطعات رخ دهد. قطعه بوش معمولاً از نوع مصرفی است، اما قطعه شفت معمولاً قطعه‌ای پیکارچه و طویل است که دیگر اجزاء ماشین بر روی آن سوار می‌گردند. بنابراین ارائه روشی برای ترمیم سطح شفت می‌تواند بسیار ضروری و مفید باشد و منجر به بازیابی شفتهای تخریب شده و کاهش هزینه‌ها گردد. در این پژوهش ابتدا تأثیر زبری سطح تداخل بر روی استحکام اتصال، ضربی اصطکاک در سطح تداخل و تخریب سطح اتصال، در حين فرآیند دموتاژ نمونه بررسی شده است. تحلیل اجزاء محدود و بررسی‌های تجربی، برای تخمین ضربی اصطکاک در سطح اتصال، انجام گرفته است. همچنین برای بررسی میزان تخریب در سطح تداخل و در حين دموتاژ نمونه از تصاویر بزرگنمایی شده سطح تداخل پس از دموتاژ نمونه اتصال استفاده شده است. در ادامه روش آبکاری کروم سخت برای ترمیم سطح شفت پیشنهاد گردید و به صورت تجربی تأثیر آبکاری کروم سخت بر روی استحکام اتصال بررسی شده است. نتایج نشان دهنده استفاده موفق از آبکاری کروم سخت برای ترمیم سطح شفت است به نحوی که استحکام اتصال در قطعات ترمیم شده معادل و حتی بیش از اتصال اولیه بود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 خداداد 1395

پذیرش: 14 مرداد 1395

ارائه در سایت: 21 شهریور 1395

کلید واژگان:

اتصال تداخلی

تحلیل اجزاء محدود

استحکام استخراج

آبکاری کروم سخت

Restoring scraped surfaces of shaft and bearing in interference fit joints by hard chromium plating

Rahman Seifi*, Kaveh Abbasi

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
* P.O.B 65175-4161, Hamedan, Iran, rseifi@basu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 07 June 2016

Accepted 04 August 2016

Available Online 11 September 2016

Keywords:

Interference fit joint

Finite element analysis

Extraction strength

Hard chromium plating

ABSTRACT

Interference fitting is widely used in the industry for connecting shafts and bushes. These types of joints are widely used as support of bearing machine parts. Repeated disassembling of shaft and bush interference fit, performed to repair and maintenance of machine parts, may cause serious damage to surface of joint parts depending on the roughness and surface quality of the contact surface of joint parts. Bushes are usually expendable parts, but the shaft parts are long integrated and complex parts which support other components of a machine. So providing a way to repair the shaft surface can be considered crucial and leads to restoration of damaged shaft and reduced costs. In this study, the effect of interference surface roughness on strength, friction coefficient of the contact surface and surface damage of interference fit joints during the disassembling procedure have been investigated. Finite element and experimental analysis were performed to estimate friction coefficient in contact surface of joint parts. Also, magnified pictures of contact surfaces were applied to evaluate the extent of damage in contact surface after disassembling of joints parts. Hard chromium plating was proposed to repair the shaft surface and the effect of hard chromium plating on strength of shaft and bush joints was measured experimentally. The results confirm successful use of hard chrome plating in repairing the shaft surface so that the strength of restored shaft joints was equal and in some instances even more than the initial joints.

نگرانی‌های مربوط به بالانس اجزا دوار در تجهیزات مکانیکی می‌گردد. روش سنتی برای محاسبه میدان تنش در سطح تداخل اتصالات تداخلی مبتنی بر حل ارائه شده لامه برای استوانه‌های جدار ضخیم و با فرض قطعات متقاضان محوری بدون عیوب سطح است [1]. با استفاده از مقادیر تنش‌های عمود بر سطح، مقدار نیروهای عمود بر سطح تداخل نیز قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از مقدار پیش‌فرض برای ضربی اصطکاک در سطح تداخل و مقدار

اتصالات تداخلی به صورت گسترده در صنعت برای ایجاد اتصالی محکم و متعادل بین شفت و بوش مورد استفاده قرار می‌گیرند. جنین اتصالاتی نیروها و تنش‌های تماسی بین سطوح ارائه می‌دهند و امکان انتقال نیرو و گشتاور را فراهم می‌آورند. اتصالات تداخلی می‌توانند برای تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار گیرند. وجود این اتصالات باعث کم شدن

۱- مقدمه

Please cite this article using:

R. Seifi, K. Abbasi, Restoring scraped surfaces of shaft and bearing in interference fit joints by hard chromium plating, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 57-64, 2016 (in Persian)

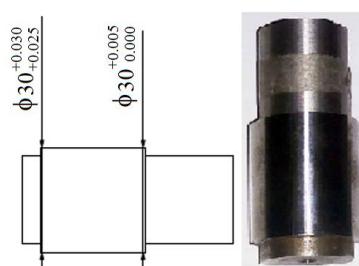
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قرار می‌گیرد. در ادامه میزان سایش ایجاد شده در سطح تماس تداخل و در خلال فرآیند دمونتاژ نیز مورد توجه قرار گرفته است. سپس آبکاری کروم ساخت، به عنوان روشی برای ترمیم تخریب سطوح تداخل استفاده شده است. تلاش شده است تا تأثیر آبکاری کروم سخت بر روی ضرب اصطکاک سطح تماس تخمین زده شود. در نهایت استفاده از این فرآیند به عنوان روشی برای بازیابی سطوح قطعات تخریب شده، توصیه می‌گردد.

2-ساخت اجزاء اتصال و مدلسازی هندسه دقیق آن‌ها

در این پژوهش، ابتدا چند نمونه برای اجزاء اتصال انتخاب و تولید شد. از این قطعات برای مطالعه اثر زبری و آبکاری، بر ضرب اصطکاک و میزان سایش در سطح تداخل اتصالات تداخلی استفاده گردید. برای ساخت شفت از فولاد استاندارد AISI 4140 (VCN 150) استفاده گردید. شفتهای توپر با قطر و طول تداخل 30.03 و 30 میلی‌متر ساخته شدند. "شکل 1" نشان دهنده ابعاد و هندسه قطعات شفت است. همچنین از کنس داخلی یاتاقان‌های استاندارد غلتکی به شماره استاندارد NA6906 نیز به عنوان بوش استفاده گردید. علت این انتخاب، دستیلی به مقدار خطای ساخت حداقل و نیز حداقل اطمینان از دقت ابعادی قطعات بوش است. قطر داخلی و خارجی و طول تداخل قطعه بوش به ترتیب 35 و 30 میلی‌متر است. بوش‌ها از فولاد استاندارد AISI 52100 ساخته شده‌اند. با توجه به ابعاد منتخب میزان تداخل شعاعی اسمی در اتصال 15 میکرومتر خواهد بود. دقت ابعادی و عدم وجود عیوب فرم در قطعه بوش، پس از اندازه‌گیری قطر داخلی کنس داخلی یاتاقان‌های غلتکی، توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات¹ اعبارستجویی شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها با دقت 0.1 میکرون، روش نمود که انحراف ابعادی بوش از استوانه کامل کمتر از یک میکرومتر است و می‌توان هندسه آن را بدون عیوب در نظر گرفت. با اطمینان از اندازه بوش و با توجه به دقت بالای تولید آن‌ها، در تحلیل‌های بعدی بوش به صورت استوانه کامل در نظر گرفته شد. "شکل 2" نمایی از فرآیند اندازه‌گیری ابعاد بوش‌ها توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری قطر داخلی بوش در 3 مقطع و در هر مقطع در 6 نقطه انجام گرفت. همچنین ترکیب شیمیایی فولادهای تشکیل دهنده شفت و بوش پس از انجام آزمایش اسپکترومتری مشخص گردید. پس از بررسی مشخص گردید که این ترکیبات مطابق با آلیاژهای استاندارد ذکر شده، می‌باشد. ترکیبات آلیاژهای شفت و بوش، به ترتیب در جداول 1 و 2 ارائه گردیده است.

در ادامه نمونه تداخلی شفت با قسمت اضافی با استفاده از دستگاه تراش تولید و با سنگ محور تلارس ابعادی دلخواه بر آن اعمال شد. این روش تولید برای ساخت قطعات شفت دقیق، کاملاً معمول می‌باشد. 6 عدد شفت تولید



شکل 1 ابعاد و هندسه قطعه شفت

نیروی عمودی در سطح تداخل، ظرفیت انتقال گشتاور این اتصالات را نیز می‌توان تخمین زد [2]. بوکر و همکارانش تلاش نمودند تا اعتبار حل لامه برای تخمین فشار تداخل و ظرفیت انتقال گشتاور اتصال را بررسی نمایند [3]. استنیزک و همکاران [4] تلاش نمودند تا ظرفیت انتقال گشتاور اتصالات تداخلی را با استفاده از روش اجزا محدود پیش‌بینی کنند.

روشن است که مقدار ضرب اصطکاک در سطح تداخل می‌تواند بر استحکام اتصال تداخلی تأثیر مستقیم بگذارد. در اغلب پژوهش‌های پیشین مقدار این ضرب با توجه به تجربیات قبلی و بدون توجه به فرآیند تولید و کیفیت سطح تولید در محاسبات لحاظ می‌گردد [5]. یکی از عوامل مؤثر بر ضرب اصطکاک و استحکام اتصال، زبری سطح تداخل است. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین تلاش شده است تا تأثیر زبری سطح بر روی استحکام اتصال مورد بررسی قرار گیرد [6-8]. در تمامی این پژوهش‌ها و اکثر پژوهش‌های مشابه مقدار ضرب اصطکاک با توجه به تجربیات گذشته و بدون توجه به کیفیت سطح در محاسبات لحاظ شده است. در این پژوهش‌ها [8-9] تلاش شده است تا اثر زبری سطح، با تغییر در تعريف مقدار تداخل در محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگران، اثر زبری بر ضرب اصطکاک را گزارش نموده‌اند [10,9]. همچنین روش نمود که مقدار زبری سطح تداخل، می‌تواند بر مقادار تخریب و سایش در سطح تداخل و در خلال فرآیند دمونتاژ کردن اتصال، تأثیر مستقیم داشته باشد.

بشورن و همکارانش [11] با استفاده از یک مدل اجزا محدود میکروسکوپی تلاش نمودند تا تأثیر توپوگرافی سطح بر ضرب اصطکاک در سطح تماس را بررسی نمایند. همچنین کاتو [12] بیان نمود که سایش و ضرب اصطکاک حاصل پاسخ سطح تماس به شرایط تریپولوژیکی سطح است و برای اهداف مهندسی می‌توان ضرب اصطکاک را به صورت خاصیت مکانیکی سطوح در تماس در نظر گرفت. یک دیدگاه جدید برای اعمال اثرات سطح در محاسبات، تغییر مقدار ضرب اصطکاک سطح تداخل با توجه به ویژگی‌های آن سطوح خاص است. سیفی و عباسی [5] در پژوهش خود روش ارائه نمودند تا بتوان ضرب اصطکاک سطح تماس اتصالات تداخلی را، مبتنی بر شرایط آن سطح تخمین زد و در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار داد.

آبکاری و عملیات حرارتی در سطح تماس اتصالات تداخلی می‌تواند باعث تغییر در شرایط و استحکام اتصال تداخلی گردد. اثر آبکاری و عملیات حرارتی در سطح تماس توسط راثو و همکارانش [13] مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر مثبت این فرآیندها بر استحکام اتصال گزارش شده است.

از سوی دیگر اتصالات در حین فرآیند تعمیرات و نگهداری صنعتی، ممکن است به کرات دمونتاژ گردد. دمونتاژ نمودن این قطعات پس از مدتی منجر به تخریب سطوح تداخل می‌شود. عموماً بخش بوش اتصالات تداخلی، عضوی مصرفی است و در خلال فرآیند تعمیرات تعویض می‌گردد. اما عضو شفت، در بسیاری از موارد دارای شکلی پیچیده و در برگیرنده قطعات بسیاری است. ترمیم سطح اجزا اتصال و بازیابی آنها می‌تواند محل بررسی‌های علمی بیشتر باشد.

در این پژوهش ابتدا تلاش شد تا با روش مطرح شده توسط سیفی و عباسی [5] اثر زبری بر ضرب اصطکاک سطح تماس بررسی گردد. برای نیل به این اهداف شفتهایی با دو مقدار زبری سطح معمول تولید شد. مقداری زبری معمول، مقادیری هستند که معمولاً در فرآیند تولید سنگزنی رخ می‌دهند و اغلب زبری حاصل از این روش تولید در محدوده دو مقدار مفروض

¹ Coordinate Measurement Machine

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ شفت

Table 1 Chemical composition of the shaft

| Ti% | Cu% | Al% | Mo% | Ni% | S% | P% | Cr% | Mn% | Si% | C% | Fe % | ترکیبات |
|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|--------------------|
| 0.006 | 0.054 | 0.02 | 0.21 | 0.08 | 0.007 | 0.012 | 1.02 | 0.89 | 0.27 | 0.38 | پایه | درصد ترکیبات آلیاژ |

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ بوش

Table 2 Chemical composition of the bush

| Co% | Cu% | Al% | Mo% | Ni% | S% | P% | Cr% | Mn% | Si% | C% | Fe % | ترکیبات |
|-----|-----|------|-----|------|--------|-------|------|------|------|------|------|--------------------|
| 0 | 0.1 | 0.01 | 0 | 0.02 | <0.003 | 0.013 | 1.53 | 0.45 | 0.31 | 0.94 | پایه | درصد ترکیبات آلیاژ |

در ادامه با استفاده از نرم افزار رئو مجیک استودیو¹ بر مدل ابر نقاط شفت و در سطح تداخل آن، صفحاتی برآش شده و فایل سه بعدی قطعه شفت ایجاد گردید. بررسی دقت حاصل از فرآیند برآش صفحات بر نقاط مدل، انحراف های زیر یک میکرومتر را نشان داد. با توجه به این مطلب می توان ادعا نمود که دقت ابعادی مدل حاصل از فرآیند برآش 1 میکرومتر است. مدل های حاصل، آماده تحلیل اجزاء محدود هستند. با توجه به این که مقادیر میدان تنش در سطح تداخلتابع هندسه سطح تداخل و خواص مواد است، در صورت اعمال دقیق خواص مواد، در تحلیل اجزاء محدود، می توان از صحت میدان تنش حاصل از تحلیل اجزاء محدود مطمئن بود. البته در بسیاری از پژوهش ها نیز استفاده موفق از تحلیل اجزاء محدود در تخمین مقادیر میدان تنش گزارش شده است [8,7]. تحلیل اجزاء محدود در این پژوهش با استفاده از نرم افزار آبکوس انجام گرفت.

3- اندازه گیری خواص مکانیکی شفت و بوش

با توجه به اهمیت خواص مکانیکی مواد در نتیجه تحلیل ها، در این پژوهش تلاش گردید تا خواص مکانیکی شفت و بوش به صورت دقیق استخراج گردد. در حل تئوری و حل به روش اجزاء محدود، نیاز است تا خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده شفت و بوش در دسترس باشد و در روابط و نرم افزار وارد گردد. صحت خواص مکانیکی مورد استفاده در تحلیل ها مستقیماً بر خروجی ها تأثیر می گذارد. بنابراین بدون اطمینان از صحت این مقادیر، نمی توان با اطمینان به نتایج حاصل از حل اجزاء محدود تکیه نمود. در این راستا تست طیف سنجی و کشش استاندارد بر روی نمونه هایی از مواد شفت و بوش انجام گردید. نتایج حاصل جداول 1 و 2، پیش از این و در جدول 3 ارائه گردیده است.

یادآور می گردد که برای تعیین خواص مکانیکی مواد ابتدا آنالیز مواد صورت گرفت و لذا خواص مکانیکی ذکر شده در منابع مورد توجه قرار گرفت. در ادامه آزمایش کشش روی نمونه های استاندارد انجام شد و خواص مکانیکی استخراج گردید. مقایسه نتایج نشان داد که خواص حاصل از تست کشش تا حد زیادی مطابق با خواص مکانیکی ذکر شده در منابع برای مواد تشکیل دهنده شفت و بوش است. در ادامه کار، خواص حاصل از تست های تجربی، مبنای بررسی های تحلیلی و عددی قرار گرفت.

جدول 3 خواص مکانیکی اندازه گیری شده مواد شفت و بوش

Table 3 Measured mechanical properties of shaft and bush materials

| استحکام تسلیم (MPa) | ضریب کنشانی (GPa) | ضریب پواسون | جرم حجمی (kg/m ³) | |
|------------------------|----------------------|-------------|----------------------------------|-----|
| 420 | 205 | 0.29 | 7850 | شфт |
| 700 | 210 | 0.3 | 7810 | بوش |

¹ Geomagic studio

Fig. 2 اندازه گیری ابعاد بوش توسط ماشین اندازه گیری مختصات (CMM)

شکل 2 اندازه گیری ابعاد بوش توسط ماشین اندازه گیری مختصات (CMM)

گردید که دو جفت آن دارای دو مقدار زیری $Ra=0.25\mu\text{m}$ و $Ra=0.16\mu\text{m}$ بودند و دو مورد از شفت ها به نحوی تولید شد که قطر آن ها در حدود 50 میکرون پایین تر از قطر اسمی منتخب بود. سطح شفت های با قطر کمتر، آبکاری کروم سخت شد تا قطر آن ها برابر قطر اسمی شود. این فرآیند در حقیقت مدلی از فرآیند ترمیم منتخب برای اصلاح سطوح تداخل قطعات و بازیابی قطعات تخریب شده است. در صورت انجام فرآیند آبکاری کروم سخت توسط افراد با تجربه و ماهر، امکان کنترل ابعاد حاصل با دقت بالا وجود دارد. در ادامه و با توجه به روش مطرح شده توسط سیفی و عباسی [5]، برای استحصال هندسه دقیق شفت ها از ابزار اندازه گیری دقیق نوری استفاده گردید. در این گام از میان هر جفت از شفت ها، تنها یک نمونه از آنها اسکن گردید و مدل ابر نقاط قطعه، استخراج شد. در "شکل 3" یک نمونه از مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن نوری مشاهده می گردد. این مدل نمونه از تعداد 104821 نقطه تشکیل شده است. همچنین در فرآیند استحصال مدل ابر نقاط با استفاده از اسکن نوری، لنز منتخب دستگاه دارای دقت اندازه گیری ابعاد تا $0.1\text{ }\mu\text{m}$ میکرومتر بود.

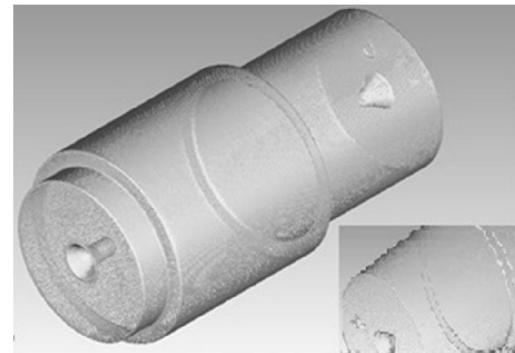


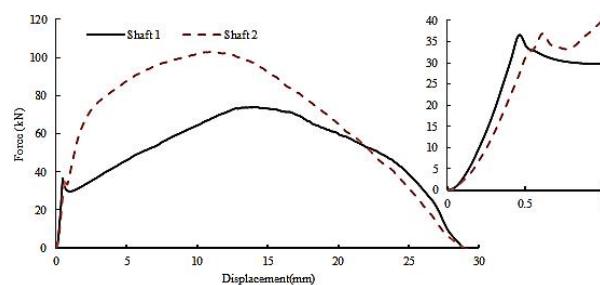
Fig. 3 Extracted point cloud images by optic camera

شکل 3 مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن نوری

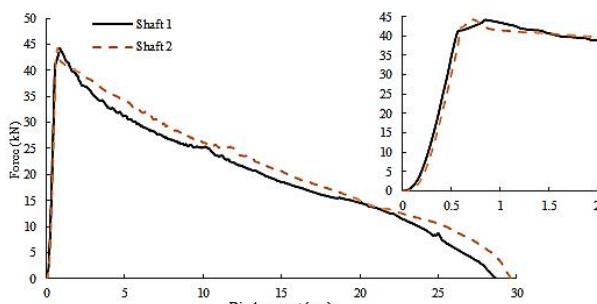
"شکل ۵" نمودار استحکام استخراج برای دو قطعه با زبری ۰.۱۶ میکرومتر را نشان می‌دهد. این نمودارها مقدار استحکام استخراج برای این قطعات را در حدود ۳۷ کیلونیوتون ثبت کرده‌اند.

همچنین "شکل ۶" نمودار استحکام استخراج قطعات با زبری ۰.۲۵ میکرومتر را در حدود ۴۴ کیلونیوتون نشان می‌دهد. در نهایت برای قطعات آبکاری شده مقدار استحکام استخراج برای دو قطعه به ترتیب حدود ۳۸ کیلونیوتون و ۴۲ کیلونیوتون ثبت گردید.

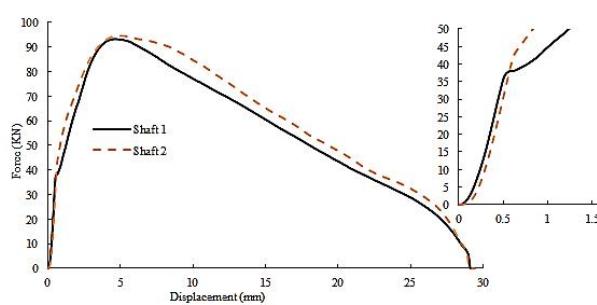
نکته قابل توجه در مورد نمودار مربوط به قطعات با سطح آبکاری، عدم بروز قله مشخص در نمودار استحکام استخراج این قطعات است. برای تشخیص استحکام استخراج در این قطعات، به صورت دقیق‌تر به روند تغییر در نرخ تغییرات نیروی استخراج با لغزش پرداخته می‌شود. بخش‌های سمت راست نمودارها، محل وقوع استحکام استخراج بر روی نمودار نیرو جابجایی، در جابجایی را نشان می‌دهند. نقطه تغییر در شب نمودار نیرو جابجایی، در ابتدای حرکت شفت در بوش، نشان دهنده استحکام اتصال استخراج اتصال خواهد بود. در مورد قطعات با سطح دارای آبکاری کروم، دقت بیشتر در بخش سمت راست نمودارها، دریافت تغییر شب و استحکام استخراج را ساده‌تر می‌نماید.



شکل ۵ نمودار نیروی استخراج تجربی اتصال دو شفت با زبری ۰.۱۶ میکرومتر



شکل ۶ نمودار نیروی استخراج تجربی اتصال دو شفت با زبری ۰.۲۵ میکرومتر



شکل ۷ نمودار نیروی استخراج تجربی اتصال دو شفت آبکاری شده.

همچنین برای سرهم کردن اجزاء اتصال، بدون ایجاد تخریب در سطح تداخلی، شفت‌ها در نیروزن مایع سرد گردید و بوش‌ها نیز در یک کوره صنعتی گرم شدند و در نهایت بدون وجود نیروی خارجی قطعات تحت سرهم شدند. با توجه به این که در فرآیند تجربی سرهم کردن اتصال، قطعات بوش گرم شدند، پیش از انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های بوش، این قطعات تحت دمای مشابه با آنچه که در فرآیند سرهم کردن رخ می‌دهد قرار گرفتند و در ادامه تست کشش بر روی نمونه‌های گرمادیده انجام گردید. همچنین متذکر می‌گردد که در هنگام انجام تست کشش بر روی قطعات، ناحیه پلاستیک نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها، پس از تبدیل مقادیر مهندسی به حقیقی مورد استفاده قرار گرفتند. بدین معنا که مقادیر تنش و کرنش پلاستیک نیز، جهت مدل‌سازی رفتار پلاستیک قطعات، در تحلیل اجزاء محدود استفاده شدند.

۴- استحکام نیروی استخراج تجربی

با استفاده از ماشین تست یونیورسال سنتام^۱ و فیکسچر طراحی شده، شفت‌ها از بوش‌ها خارج شده و نیروی مورد نیاز برای استخراج آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نیرو و نمودارهای حاصل را نمودار استحکام استخراج اتصالات تداخلی می‌نامند که معیاری پذیرفته شده و فرآگیر برای سنجش استحکام اتصالات به صورت تجربی است. همان‌طور که بیان شد برای هر کدام از مقادیر زبری ۰.۱۶ و ۰.۲۵ میکرومتر دو نمونه ساخته شده و به همراه نمونه‌های آبکاری شده با کروم سخت مورد بررسی تجربی قرار گرفتند. تجهیزات مورد استفاده برای استحکام نیروی استخراج در "شکل ۴" نشان داده شده است. بررسی‌های تجربی نشان داد که نمونه‌های مشابه دارای استحکام استخراج مشابه هستند. نمودار نیروی استخراج هر جفت از قطعات با زبری متفاوت و قطعات آبکاری شده، در نمودارهای "شکل‌های ۵، ۶ و ۷" نشان داده شده است.



شکل ۴ فرآیند استخراج با فیکسچر و ماشین تست یونیورسال. (الف) ماشین تست یونیورسال. (ب) فیکسچر طراحی شده برای استخراج اتصالات سرهم شده. (پ) قطعات سرهم شده و فیکسچر طراحی شده بر روی ماشین تست یونیورسال

^۱ Santam

شافت در حدود 70000 المان بوده است. "شکل های 8 و 9" تغییرات تنش شعاعی بر روی شفت استوانه‌ای کامل و شفته که هندسه دقیق آن مورد تحلیل اجزاء محدود قرار گرفته است را نشان می‌دهد. "شکل 9" تغییرات قبل توجه در مقادیر محلی تنش‌های شعاعی را نشان می‌دهد. این تغییرات به واسطه، تغییر در هندسه شفت‌ها را داده است. این دو شکل، به روشنی بیانگر توأی اسکرینی منتخب برای مدل‌سازی هندسه دقیق شفت‌ها، در دریافت تغییرات محلی تنش سطح تمام است.

5-2- مدل‌سازی اجزاء محدود استخراج اتصال

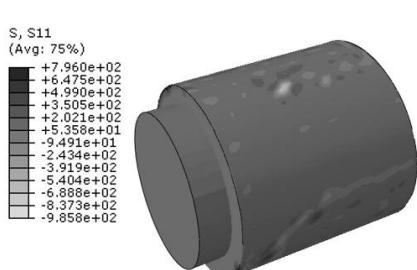
برای مدل‌سازی اجزاء محدود استخراج شفت از بوش و استعمال استحکام و نیروی استخراج می‌باشد قیدهایی بر قطعات اعمال گردد. این مهم پس از ایجاد تداخل در گام نخست تحلیل انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی استخراج تلاش می‌گردد تا قیود مشابه آنچه که در فرآیند تحریب اعمال می‌گردد، شبیه‌سازی شود. سطح بالای بوش در راستای Z بدون حرکت گردید. تمامی نقاط سطح بالای بخش افزوده شفت با نقطه مرتعی در مرکز آن کوپل و قفل شدند. کوپل کردن سطح بالای بوش با نقطه مرتعی، در بخش تعریف قیود و در مدول اندرکنش نرم‌افزار آباکوس امکان‌پذیر است.

سپس این نقطه در تمامی درجات آزادی بسته گردید و در گام دیگری در راستای Z به اندازه 1 میلی‌متر حرکت داده شد. برای اعمال اصطکاک از مدل کولمب استفاده گردید. استفاده از لغزش کوچک در تحلیل تماس، ناشی از محدودیت‌های مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس است. با توجه به اعمال این نوع لغزش، حرکت شفت در خلال شبیه‌سازی فرآیند استخراج، مقدار محدود بک میلی‌متر انتخاب گردید. "شکل 10" نحوه اعمال قیود به مدل اجزاء محدود، جهت مدل‌سازی استخراج اتصال را نشان می‌دهد.

مقدار ضرب اصطکاک اولیه در مدل‌سازی معادل 0.2 اعمال گردید. روشن است که استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود کاملاً



شکل 8 تنش شعاعی (پاسکال) روی سطوح تداخل در شفت بدون عیوب



شکل 9 تنش شعاعی (مگاپاسکال) روی سطوح تداخل در شفت با وجود عیوب فرم

در این بخش یک نتیجه کلی نشان می‌دهد که افزایش زبری در سطح تداخل قطعات می‌تواند منجر به افزایش استحکام استخراج اتصالات تداخلی گردد. همچنین مقایسه بین استحکام استخراج قطعات آبکاری شده با استفاده از کروم سخت، نمایانگر این مطلب است که فرآیند ترمیم، باعث حفظ استحکام استخراج در محدوده‌ای بینابین قطعات با زبری 0.16 و 0.25 میکرومتر است. نکته قابل ذکر دیگر این که محدوده زبری معمول حاصل، پس از عملیات سنگرزنی قطعات عددی در محدوده زبری یک میکرومتر خواهد بود. این مطلب نشان از منطقی بودن عدد زبری قطعات آزمایشی و نزدیک بودن زبری سطح آن‌ها به موارد صنعتی و کاربردی است.

5-3- مدل‌سازی اجزاء محدود

استفاده از تحلیل اجزاء محدود برای بررسی میدان تنش در اتصالات تداخلی در سیاری از پژوهش‌های پیشین مطرح بوده است. به عنوان نمونه جیانگ و همکارانش [14] اعتبار نتایج تحلیل اجزاء محدود اتصالات تداخلی را با استفاده از نتایج تجربی بررسی و تأیید نمودند. همچنین پاتیل و همکارانش [9] تلاش نمودند تا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، اثر زبری در سطح تداخل را بر ضریب اصطکاک استیاتیکی بررسی نمایند. روشن است که نتایج تحلیل اجزاء محدود بسیار وابسته به صحت پارامترهای ورودی تحلیل است. در این پژوهش نیز تلاش می‌گردد تا با تحلیل اجزاء محدود هندسه دقیق اجزاء اتصال تداخلی و با اعمال مقادیر دقیق خواص مکانیکی مواد، میدان تنش و نیروها در سطح تداخل محاسبه گردد. لازم به یادآوری است که اندازه‌گیری تجربی میدان تنش در سطح تداخل اتصالات تداخلی، هدفی سخت و حتی دور از دسترس است.

فرضیات مورد استفاده در مدل‌سازی تداخل اتصالات تداخلی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

- بوش‌ها به صورت قطعات استوانه‌ای با هندسه بدون عیوب مدل شدند.
- اثرات حرارت اعمالی بر روی بوش و در خال فرآیند سرهم کردن، در تحلیل وارد نشده است. اما در فرآیند استحکام خواص تحریب مواد تشکیل دهنده بوش، نمونه‌های تست کشش، پیش از آزمایش در شرایط حرارتی مشابه قرار گرفتند. همچنین فرض گردید که تغییرات دما تأثیری بر هندسه بوش نخواهد گذاشت.
- برای مدل‌سازی اجزاء محدود تداخل، از تماس با لغزش کوچک استفاده گردید.
- همان‌طور که بیان گردید، خواص مواد، مبتنی بر تست‌های تجربی اندازه‌گیری و به تحلیل اجزاء محدود اعمال گردید. همچنین، رفتار پلاستیک مواد، پیش از فرآیند گلوبی شدن نیز، اندازه‌گیری و به تحلیل اعمال گردید.

- رفتار اصطکاکی در سطح تماس با مدل کولمب شبیه‌سازی گردید. فرض بر این قرار گرفت که ضرب اصطکاک مسنتقل از سرعت لغزش است. مقدار ضرب اصطکاک در تحلیل اولیه اجزاء محدود 0.2 در نظر گرفته شد.

شافت و بوش با استفاده از المان‌های 10 گرهی چهاروجهی (C3D10M) شبکه بنده شدند. استقلال نتایج از اندازه شبکه‌بنده نیز بررسی گردید و اندازه مناسب برای شبکه‌بنده انتخاب شد. لازم به یادآوری است که قسمت انتهایی اضافه شده به مدل شفت، جهت اعمال قیدها و شرایط مرزی به سیستم مورد استفاده قرار گرفت. متوسط تعداد المان‌های مورد استفاده برای شبکه‌بنده

به بیان ریاضی می‌توان انتگرال نیروهای عمودی بر سطح تداخل را با استفاده از رابطه (۱) بسط داد.

$$F_N = \int \sigma_r dA = \frac{ES}{f} \quad (1)$$

که در رابطه فوق ES بیانگر استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود و f ضریب اصطکاک سطح تداخل است. F_N معادل انتگرال نیروهای عمودی بر سطح تداخل است. با توجه به اعمال خواص مکانیکی به صورت تجربی و اعمال هندسه دقیق قطعات در تحلیل اجزاء محدود، می‌توان تخمینی دقیق از مقدار نیروهای عمودی وارد بر سطح تداخل را محاسبه نمود. در ادامه با تقسیم استحکام استخراج تجربی بر نیروهای عمود بر سطح، می‌توان تخمینی اولیه از مقدار ضریب اصطکاک به دست آورد. پس از جایگذاری این مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، مجددًا می‌توان مقدار ضریب اصطکاک را اصلاح نمود. فرآیند مذکور تا جایی تکرار می‌گردد که مقدار ضریب اصطکاک، به یک مقدار ثابت همگرا شود.

جدول ۴ مقادیر نیروی عمودی بر سطح حاصل از تحلیل اجزاء محدود، نیروی استخراج اجزاء محدود با استفاده از ضریب اصطکاک تنظیم شده و ضریب اصطکاک تخمینی را نشان می‌دهد.

با مقایسه دقیق‌تر مقادیر نیروی عمودی سطح تداخل حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای قطعات با زبری ۰.۲۵ و آبکاری شده، می‌توان این‌گونه استبیاط نمود که سطح تماس و مقدار تداخل در قطعه آبکاری شده بیش از قطعه با زبری بالاتر است. البته با توجه به این که مقدار تداخل متوسط در قطعات معادل ۱۵ میکرومتر تنظیم شده است به نظر می‌رسد که دلیل اصلی این افزایش در مقدار نیروی عمودی بر سطح، همان افزایش در سطح تماس تداخل می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب اصطکاک در قطعه با زبری ۰.۲۵ میکرومتر بیش از قطعه آبکاری شده است، در حالی که استحکام استخراج تجربی قطعه آبکاری شده، اندکی بیش از قطعه زبر است. این مهم نیز، به دلیل بیشتر بودن مقدار نیروی عمودی در قطعه آبکاری شده است، که البته امکان بیشتر بودن سطح تماس در قطعه آبکاری شده به نسبت قطعه با زبری ۰.۲۵ را تقویت می‌کند. با توجه به کیفیت سطح بالای حاصل از آبکاری کروم سخت، به نظر می‌رسد که عامل اصلی افزایش نیروی عمودی در قطعه آبکاری، افزایش سطح تماس باشد.

جدول ۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی مقادیر استحکام استخراج و اندازه ضریب اصطکاک تخمینی برای شفت دارای عیوب فرم

Table 4 Comparison of numerical and experimental values for the extraction strength and estimated friction coefficients for imperfect shaft

| آبکاری | $Ra=0.25$ | $Ra=0.16$ | سطح شفت |
|---------|-----------|-----------|--|
| 34355.3 | 33095.1 | 30977.9 | نیروی استخراج اجزاء محدود اولیه (N) |
| 171777 | 165476 | 154890 | نیروی عمودی سطح (N) |
| 0.253 | 0.261 | 0.234 | ضریب اصطکاک تخمینی |
| 44197.5 | 44008.8 | 36457.4 | استحکام استخراج اجزاء محدود تنظیم شده (N) |
| 44331 | 44194 | 36572 | استحکام استخراج تجربی (N) |

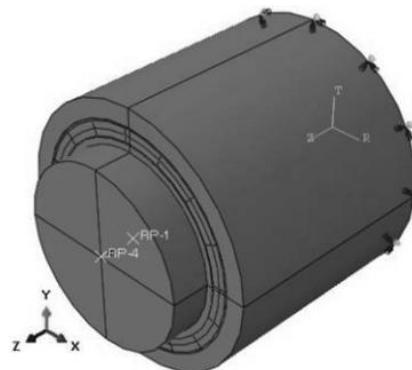


Fig. 10 Applied constraints for modelling of the extraction strength
شکل ۱۰ قید اعمالی برای مدل‌سازی استحکام استخراج

وایسته به خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک است؛ اما فشار و تنش‌ها در سطح تماس و پیش از استخراج مستقل از ضریب اصطکاک است [۵]. شکل ۱۱ اطلاعات حاصل از تحلیل اجزاء محدود استخراج سه شفت با زبری ۰.۱۶ و ۰.۲۵ و آبکاری شده از بوش را در قالب نمودار نیوتن-جاچایی ارائه می‌دهد. مقادیر استحکام استخراج حاصل از مدل‌سازی اولیه برای قطعات با زبری ۰.۱۶ و ۰.۲۵ و آبکاری شده به ترتیب ۳۰۹۷۷.۹، ۳۳۰۹۵.۱ و ۳۴۳۵۵.۳ نیوتن است. همان‌طور که در نمودار "شکل ۱۱" ملاحظه می‌شود، با توجه به استفاده از لغزش کوچک در مدل‌سازی استخراج، مقدار حرکت شفت در بوش محدود به ۱ میلی‌متر است. با مقایسه مقادیر استحکام استخراج تجربی و اجزاء محدود، تفاوت بزرگی بین نمونه‌های متناظر مشاهده می‌گردد. با توجه به این که تلاش شده است تا هندسه اجزاء اتصال با حداکثر دقت مدل شود و همچنین با توجه به این که خواص مکانیکی مواد برابر با تست‌های تجربی به تحلیل اجزاء محدود اعمال شده است، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب اصطکاک تنها دلیل تفاوت بین مقادیر تجربی و تحلیلی استحکام استخراج است.

۶- تخمین ضریب اصطکاک سطح تداخل
در ادامه و طریق روش ارائه شده توسط سیفی و عباسی [۵] تلاش می‌گردد تا ضریب اصطکاک سطح تداخل قطعات با استفاده از نتایج استحکام استخراج تجربی، تخمین زده شود.

از تقسیم استحکام استخراج اجزاء محدود بر ضریب اصطکاک اعمالی در مدل می‌توان مقدار مجموع نیروهای عمودی اعمالی بر سطح تداخل را بدست آورد.

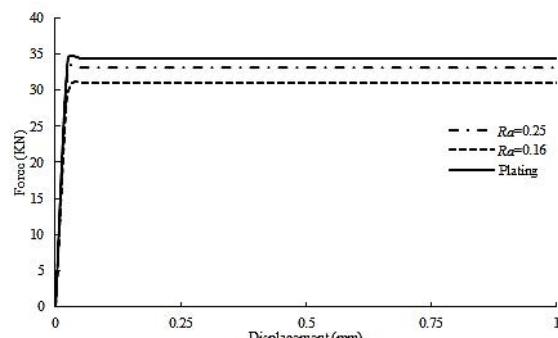
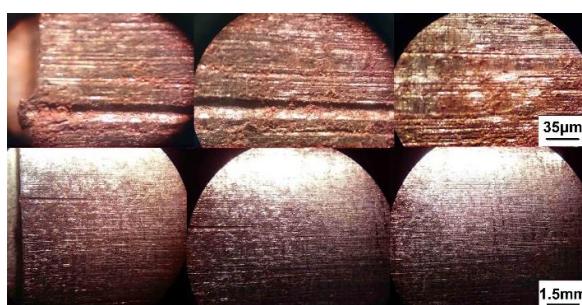


Fig. 11 Variation of numerical extraction force versus displacement
شکل ۱۱ تغییرات نیروی استخراج عددی بر حسب جاچایی



شکل 13 سطح تماس شفت دمونتاز شده با زیری 0.25 میکرومتر

همچنین در سطح تداخلی که دارای برجستگی‌های منفرد نیست، مقدار تنفس معادل که معیار پلاستیسیته در سطح است، معادل نصف فشار تداخل خواهد بود [16]. با توجه به مطالعه فوق می‌توان این گونه بیان نمود که زیری و نامنظمی‌های سطحی با دامنه بالاتر، منجر به مقادیر بالاتر تنفس مؤثر خواهد شد [17]. مقادیر تنفس بالای استحکام تسیلیم منجر به تسطیح قله‌ها و رخداد تغییر شکل پلاستیک در سطح تداخل خواهد شد [18]. اما در قطعات با زیری پایین‌تر به نظر می‌رسد که سطح تداخل پلاستیک نمی‌گردد و در خلال فرآیند استخراج بوش از شفت زیری‌های همواره با یکدیگر درگیر خواهند شد و تجمع این درگیری‌ها منجر به سایش و خراش‌های عمیق در سطح قطعات خواهد شد. در مورد قطعات آبکاری شده، به نظر می‌رسد که سطح دارای زیری کوچکتر باشد که البته در صورت وجود وجود ناظمی در سطح نیز، دامنه زیری‌ها کمتر از دیگر قطعات خواهد بود. بنابراین سایش در سطح قطعات آبکاری کمتر از قطعات زبر است و سایش در قطعات با زیری 0.25 به دلیل پلاستیک شدن زیری‌ها کمتر از سایش موجود در سطح قطعات با زیری 0.16 خواهد بود.

8-بحث و نتیجه گیری

به عنوان نتیجه اصلی این پژوهش می‌توان به امکان استفاده موفق از آبکاری کروم سخت برای ترمیم سطح تداخل اجزاء اتصالات تداخلی اشاره نمود. این مهم در بررسی تجربی به اثبات رسید و مشاهده شد که قطعات آبکاری شده، استحکامی معادل با قطعات تولید شده و بدون عیب ارائه کردند. معمولاً در ماشین‌ها اتصالات تداخلی برای انتقال گشتاور به صورت گستره مورد استفاده قرار می‌گیرند. اغلب اوقات یکی و یا هر دو جزء این اتصالات، قطعاتی پیچیده هستند و در صورت تخریب سطح تداخل آن‌ها در خلال فرآیند دمونتاز نمودن اجزاء اتصال، تعویض آن‌ها منجر به تحمیل هزینه‌های بالا می‌گردد. بنابراین در این موارد استفاده از آبکاری کروم سخت می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر ترمیم سطح تداخل در نظر گرفته شود.

همچنین بررسی‌ها نشان داد که افزایش زیری در سطح تداخل می‌تواند منجر به افزایش استحکام و ضریب اصطکاک در اتصال گردد. از طرف دیگر، افزایش زیری منجر به کاهش سایش در سطح تداخل نیز خواهد شد. البته به نظر می‌رسد این کاهش سایش منجر به تسطیح سطح تداخل گردد. بنابراین در استفاده مجدد از این قطعات می‌بایست پیش از به کارگیری آنها، ابعاد آن‌ها به دقت کنترل شود و بررسی گردد که آیا تغییر شکل‌های پلاستیک در سطح قطعات باعث کاهش ابعاد آنها نشده است.

مطلوب قابل توجه دیگر، افزایش نیروی عمودی در سطح تداخل قطعات آبکاری شده، به نسبت دیگر قطعات است. به نظر می‌رسد که منشأ این

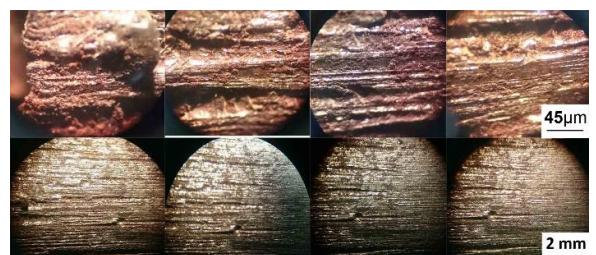
تا به اینجا به نظر می‌رسد که استفاده از آبکاری کروم سخت شده برای ترمیم سطح تداخل، به نحو موفقی در حفظ استحکام اتصال عمل نموده است. همچنین استفاده از آبکاری کروم سخت باعث افزایش کیفیت سطح تداخل شده است. البته آبکاری کروم سخت باعث کاهش در ضریب اصطکاک نسبت به قطعه با زیری 0.25 میکرومتر و افزایش در ضریب اصطکاک به نسبت قطعه با زیری سطح 0.16 میکرومتر شده است. بنابراین به نظر می‌رسد که آبکاری کروم در سطح تداخل می‌تواند با افزایش سطح تماس، اثری مشابه به افزایش زیری در سطح تماس داشته باشد و در عین حال باعث کاهش ضریب اصطکاک در سطح تماس گردد.

در ادامه به بررسی وضعیت سطح جدایش و میزان سایش در سطح قطعات پرداخته شده و تأثیر آبکاری کروم سخت در مقدار سایش مطالعه شده است.

7-سایش در سطح تماس

در خلال استخراج شفت از بوش ممکن است سطح شفت و بوش تخریب گردد. همان‌طور که پیش از این بیان گردید در تست‌های انجام شده در این پژوهش، کنس داخلی یاتاقان به عنوان بوش در اتصال دخالت داده شد. روشن است که یاتاقان‌ها معمولاً مقاومت به سایش بالایی دارند، بنابراین در خلال فرآیند استخراج سایش حاصل در سطح بوش‌ها ملاحظه نشد. از طرف دیگر همان‌طور که بیان گردید، قطعه بوش معمولاً مصرفی است و در فرآیند تعمیرات صنعتی، اغلب این قطعه به صورت مجزا تعویض می‌گردد. بنابراین در ادامه تخریب در سطح شفت‌ها بررسی گردید. "شکل‌های 12 و 13" به ترتیب، سطح تداخل شفت‌های با زیری 0.16 و 0.25 میکرومتر را نشان می‌دهد. نکته قابل ذکر دیگر این که سطح شفت دارای آبکاری کروم سخت، پس از استخراج، هیچ گونه سایشی نشان نداد و بنابراین بررسی میکروسکوپی این سطوح انجام نشد. بهطور کلی به عنوان اولین نتیجه بررسی‌های سطح تداخل پس از استخراج می‌توان عدم رخداد سایش در سطح قطعات دارای آبکاری را مطرح نمود.

با توجه به "شکل‌های 12 و 13" روشن است که افزایش زیری نه تنها باعث بالا رفتن استحکام اتصال می‌گردد بلکه موجب کاهش سایش در سطح شفت نیز خواهد شد. این مشاهدات در بررسی سطح تداخل دو نمونه دیگر قطعات با زیری 0.16 و 0.25 نیز تکرار گردید. در توجیه این مطلب می‌توان به این نکته توجه نمود که در قطعات زیری بالاتر، وجود قله‌های منفرد در سطح تداخل متحمل تر است. همچنین با توجه به میدان تنفس در سطح تداخل، مقدار تنفس شعاعی در قله‌های منفرد سطح بیشینه خواهد بود و مقادیر تنفس‌های محیطی و محوری تقریباً صفر خواهد بود، بنابراین مقدار تنفس مؤثر جهت بررسی پلاستیسیته در سطح تداخل و قله‌ها، معادل فشار تداخل خواهد بود [15].



شکل 12 سطح تماس شفت دمونتاز شده با زیری 0.16 میکرومتر

914–925, 2010.

- [5] R. Seifi, K. Abbasi, Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, *Engineering failure analysis*, Vol. 57, pp. 310–322, 2015.
- [6] G. M. Yang, J. C. Coquille, J. F. Fontaine, M. Lambertin, Influence of roughness on characteristics of tight interference fit of a shaft and a hub, *International journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 42–43, pp. 7691–7701, 2001.
- [7] R. H. Thornley, I. Elewa, The static and dynamic stiffness of interference shrink-fitted joints, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 28, No. 2, pp. 141–15, 1988.
- [8] H. Boutoutaou, M. Bouazi, J. F. Fontaine, Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3692–3701, 2011.
- [9] D. B. Patil, M. Eriten, Effects of interfacial strength and roughness on the static friction coefficient, *Tribology Letters*, Vol. 56, No. 2, pp. 355–374, 2014.
- [10] N. B. Demkin, V. V. Izmailov, The relation between the friction contact performance and the microgeometry of contacting surfaces, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 31, No. 1, pp. 48–55, 2010.
- [11] S. R. M. Moghaddam, M. S. Redfern, K. E. Beschorner, A microscopic finite element model of shoe-floor hysteresis and adhesion friction, *Tribology letters*, Vol. 59, No. 3, pp. 1–10, 2015.
- [12] K. Kato, Wear in relation to friction - a review, *Wear*, Vol. 241, No. 2, pp. 151–157, 2000.
- [13] P. V. Rao, B. Ramamoorthy, V. Radhakrishnan, Effect of plating and temperature on the strength of shrink fitted assemblies, *International journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 33, No. 3, pp. 475–481, 1993.
- [14] J. Jiang, Y. Bi, H. Dong, Y. Ke, X. Fan, K. Du, Influence of stress in hi-lock bolt insertion, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, No. 18, pp. 3296–3305, 2014.
- [15] R. Buczkowski, M. Kleiber, A study of the surface roughness in elasto-plastic shrink fitted joint, *Tribology International*, Vol. 98, pp. 125–132, 2016.
- [16] J.F. Fontaine, I. E. Siala, Form defect influence on the shrinkage fit characteristics, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 17, No. 1, pp. 107–119, 1998.
- [17] M. Masjedi, M. M. Khonsari, On the effect of surface roughness in point-contact EHL: Formulas for film thickness and asperity load, *Tribology International*, Vol. 82, Part A, pp. 228–244, 2015.
- [18] P. Todorovic, B. Tadic, D. Vukelic, M. Jeremic, S. Randjelovic, Analysis of the influence of loading and the plasticity index on variations in surface roughness between two flat surfaces, *Tribology International*, Vol. 81, pp. 276–282, 2015.

افزایش در افزایش سطح تماس در قطعات آبکاری باشد. به هر حال قطعات آبکاری شده، کیفیت سطح بهتری را ارائه خواهند نمود که البته منجر به کاهش ضربی اصطکاک نیز خواهد شد. اما در نهایت، می‌توان با این روش ترمیم استحکام اتصال را حفظ و سایش ناشی از دمونتاژ کردن در سطح تداخل را نیز کاهش داد.

لازم به ذکر است که روش آبکاری کروم سخت در ترمیم سطح تداخل، پوشش یاتاقان کلاچ یک توربین، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت و منجر به کاهش هزینه‌های تعمیراتی این توربین نیز گشت.

۹. فهرست عالیم

| | |
|----------|-----------------------------------|
| A | مساحت (m^2) |
| ES | استحکام استخراج ($kgms^{-2}$) |
| f | ضریب اصطکاک |
| F | نیرو ($kgms^{-2}$) |
| σ | علایم یونانی ($kgm^{-1}s^{-2}$) |
| N | زیرنویس‌ها |
| r | عمودی |
| | شعاعی |

۱۰. مراجع

- [1] S. P. Timoshenko, *Strength of materials part II: advanced theory and problems*, third edition, pp. 213–214, Krieger Publication Co, 1956.
- [2] S. W. Lee, D. G. Lee, Torque transmission capability of composite–metal interference fit joints, *Composite Structures*, Vol. 78, No. 4, pp. 584–595, 2007.
- [3] J. D. Booker, C. E. Truman, S. Wittig, Z. Mohammed, A comparison of shrink-fit holding torque using probabilistic, micromechanical and experimental approaches, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, pp. 175–187, 2004.
- [4] L. Snizek, J. Zimmerman, A. Zimmerman, The carrying capacity of conical interference-fit joints with laser reinforcement zones, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 6–7, pp.